

新世纪土木工程系列规划教材

智能材料

陈英杰 姚素玲 编



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新世纪土木工程系列规划教材

智能材料

陈英杰 姚素玲 编



机械工业出版社

智能材料是新材料领域中正在形成的一门新的交叉学科,是被誉为 21 世纪新材料中非常重要的一种先进材料,它要求材料具有一些生物体才有的功能,如传感、判断、处理、执行乃至自预警、自修复、刺激响应等。本书共分 10 章,主要内容包括智能材料概况,智能材料各基本组元(形状记忆合金、压电复合材料、电磁流变体、智能纤维材料、智能高分子材料、其他传感元件等)的应用原理、力学特性、本构关系模型及其应用等,智能混凝土的智能特性和应用,智能材料在结构控制领域的应用,智能橡胶与智能弹性体。

本书可作为高等院校智能材料课程的教材,也可供从事智能材料研究的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能材料/陈英杰,姚素玲编. —北京:机械工业出版社,2013.5

新世纪土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-34348-6

I. ①智… II. ①陈…②姚… III. ①智能材料—高等学校—教材
IV. ①TB381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 043846 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 王 婧

版式设计:霍永明 责任校对:陈 越

封面设计:张 静 责任印制:张 楠

北京华正印刷有限公司印刷

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13 印张·318 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-34348-6

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

目
录

随着人类社会科技水平的不断提高以及人类对生命认识的不断深化,从仿生角度出发,在丰厚的相关学科理论和技术基础之上,人们提出了智能材料(Intelligent Material)的概念,也称为灵巧材料或机敏材料(Smart Material)。智能材料是新材料领域中正在形成的一门交叉学科,是被誉为21世纪新材料中非常重要的一种先进材料。材料智能化要求材料具有一些生物体才有的功能,如传感、判断、处理、执行乃至自预警、自修复、刺激响应等,因此材料智能化是一项具有挑战性的任务,目前仍处于发展的初级阶段。

目前,智能材料正受到各方面的关注,从其结构的构思到智能材料的新制法(分子和原子控制、粒子束技术、中间相和分子聚集等)、自适应材料和结构、智能超分子和膜、智能凝胶、智能药物释放体系、神经网络、微机械智能光电子材料等方面都在积极开展研究。主要的应用领域有航空航天飞行器方面(飞行器机翼的疲劳断裂检测及形状自适应控制,湍流控制的智能蒙皮,大型柔性空间机构的阻尼振动控制),土木建筑及混凝土方面(桥梁、建筑等振动的主动控制以及风灾和地震时的自适应控制,机构健康检测,土建施工中的质量检测),火警探测及控制,管道系统的腐蚀和冲蚀探测,高寂静产品的噪声控制,空气质量、温度控制及减振降噪,能量的最佳利用,在用系统性能的评估和残留寿命的预测,机器人的人工四肢等。

本书共分10章。第1章介绍了智能材料的背景和材料的智能化及其应用前景。第2章至第7章分别介绍了智能材料各基本组元(形状记忆合金、压电复合材料、电磁流变体、智能纤维材料、智能高分子材料、其他传感元件等)的应用原理、力学特性、本构关系模型及其应用情况等。第8章和第9章介绍了智能材料在土木工程中的应用,第8章介绍了智能混凝土(损伤自诊断混凝土、温度自调节混凝土、仿生自愈合混凝土)的智能特性和应用情况;第9章介绍了智能材料在结构控制领域的应用情况,第10章介绍了智能橡胶与智能弹性体。

本书编写得到了机械工业出版社的帮助,在此表示衷心感谢。编写过程中,李青山和梁鹏花做了大量工作,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,加之学科领域跨度大,书中难免有不尽读者之意的地方,请读者多多批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 智能材料概述	1
1.1 材料发展的新纪元——智能材料.....	1
1.2 智能结构.....	2
1.3 智能材料的内涵和定义.....	3
1.4 耗散结构与材料的内禀特性.....	6
1.5 材料的智能化.....	11
1.6 智能材料和结构的应用前景及发展趋势.....	16
思考题.....	22
参考文献.....	23
第2章 形状记忆合金	24
2.1 形状记忆合金的发展和机理.....	24
2.2 形状记忆合金的本构关系.....	26
思考题.....	32
参考文献.....	32
第3章 压电复合材料	34
3.1 压电复合材料研究概况.....	34
3.2 压电效应及压电复合材料基本理论.....	38
思考题.....	50
参考文献.....	51
第4章 电磁流变体	52
4.1 电流变体研究概况.....	52
4.2 电流变液的性能研究.....	58
4.3 磁流变体.....	62
4.4 电、磁流变液的力学特性.....	74
4.5 电流变液及磁流变液的应用.....	76
思考题.....	79
参考文献.....	79
第5章 智能纤维材料	80
5.1 导电纤维.....	80
5.2 感应（介电质）性纤维材料.....	81
5.3 光纤及光纤传感技术.....	82

5.4 光纤智能复合材料的研究	85
5.5 基于光纤传感技术的土木工程结构健康监测	90
5.6 形状记忆纤维	91
5.7 变色纤维	91
5.8 调温纤维	91
5.9 智能抗菌纤维	92
思考题	92
参考文献	92
第6章 智能高分子材料	93
6.1 高分子材料的智能性	93
6.2 智能高分子材料的设计原理及合成方法	94
6.3 医用智能高分子材料	95
6.4 分离智能高分子	109
6.5 智能高分子材料应用与开发	128
思考题	142
参考文献	142
第7章 其他传感元件	143
7.1 电阻应变丝的研究	143
7.2 碳纤维复合材料	151
7.3 智能无机非金属高分子复合材料及其应用	157
7.4 二氧化钒智能窗	158
7.5 半导体材料	161
7.6 疲劳寿命丝 (箔)	161
思考题	161
参考文献	161
第8章 智能混凝土	163
8.1 智能混凝土发展概况	163
8.2 目前智能混凝土的智能特性	165
思考题	170
参考文献	170
第9章 结构控制	171
9.1 结构控制概念简介	171
9.2 形状记忆合金在结构控制中的运用	173
9.3 隔震器和消能器	179
思考题	188
参考文献	188
第10章 智能橡胶与智能弹性体	189
10.1 智能橡胶	189

10.2 智能橡胶材料及制品的最新进展	189
10.3 智能弹性体	193
10.4 D-智能弹性体	194
10.5 Sh-智能弹性体	199
思考题	200
参考文献	200

第 1 章 智能材料概述

随着现代科技的进步,尤其电子信息技术的快速发展,人们对建筑物的高效化、多功能化的要求也越来越高。智能化住宅的研制一度成为全球关注的热点,并取得突破性进展,智能建筑应运而生。智能建筑的出现,是现代高科技与现代建筑理念、设计相结合的新型产物。其历史虽短,但前景广阔,在世界各国发展迅猛,已呈 21 世纪建筑发展主流之势。除智能建筑外,智能材料的研制步伐也在加快。如英国科学家研制出的智能型温室覆盖材料、德国科学家研制的智能纤维增强材料等。这些材料的特点是能够根据外界环境变化实现智能型自适应控制、调整材料特性。智能材料与智能建筑相结合无疑将为人们提供一个安全、舒适的生活、学习与工作环境空间。

1.1 材料发展的新纪元——智能材料

20 世纪 80 年代中期,人们提出了智能材料的概念。智能材料要求材料体集感知、驱动和信息处理于一体,类似生物材料那样具有智能属性,具备自感知、自诊断、自适应、自修复等功能。

20 世纪 50 年代,人们提出了智能结构,当时称为自适应系统(Adaptive System)。在智能结构的发展过程中,人们越来越认识到智能结构的实现离不开智能材料的研究和开发。1988 年 9 月,美国陆军研究办公室组织了首届智能材料、结构和数学的专题研讨会,1989 年日本航空-电子技术审议会提出了从事具有对环境变化作出相应能力的智能型材料的研究。从此,这样的会议在国际上几乎每年一届。由已公布的资料来看,美国的研究较为实用,是应用需求驱动了研究与开发;日本偏重于从哲学上澄清概念,目的是创新拟人智能的材料系统,甚至企图与自然协调发展。因此,开始时美、日分别用“机敏”(Smart)和“智能”(Intelligent)一类定语,随着这种材料的出现,人们已逐渐接受“智能材料”这一概念。那么什么是智能材料?

智能材料来自于功能材料。功能材料有两类,一类是对外界(或内部)的刺激强度(如应力、应变、热、光、电、磁、化学和辐射等)具有感知的材料,通称感知材料,用它可做成各种传感器;另一类是对外界环境条件(或内部状态)发生变化作出相应或驱动的材料,这种材料可以做成各种驱动(或执行)器。智能材料是利用上述材料做成传感器和驱动器,借助现代信息技术对感知信息进行处理并把指令反馈给驱动器,从而作出灵敏、恰当的反应,当外部刺激消除后又能迅速恢复到原始状态。这种集传感器、驱动器和控制系统于一体的智能材料,体现了生物的特有属性。

智能材料的提出是有理论和技术基础的。20 世纪因为科技发展的需要,人们设计和制造出新的人工材料,使材料的发展进入从使用到设计的历史阶段。可以说,人类迈进了材料合成阶段。

高技术的要求促进了智能材料的研制,原因是:

- 1) 材料科学与技术已为智能材料的诞生奠定了基础,先进复合材料(层合板、三维及

多维编织) 的出现, 使传感器、驱动器和微电子控制系统等的复合或集成成为可能, 也能与结构融合并组装成一体。

2) 对功能材料特性的综合探索 (如材料的机电耦合特性、热机耦合特性等) 及微电子技术和计算机技术的飞速发展, 为智能材料与系统所设计的材料耦合特性的利用、信息处理和控制打下基础。

3) 军事需求与工业界的介入使智能材料与结构更具挑战性、竞争性和保密性, 使它成为一个高技术、多学科综合交叉的研究热点, 而且也加速了它的实用化进程。例如, 1979 年, 美国国家航空航天局 (NASA) 启动了一项有关机敏蒙皮中用光纤检测复合材料的应变与温度的研究, 此后就大量开展了有关光纤传感器监控复合材料固化, 结构的无损探测与评价, 运行状态检测、损伤探测与估计等方面的研究。

1.2 智能结构

智能结构将智能材料形成的驱动件和传感元件紧密融合在结构中, 同时也将控制电路、逻辑电路、信号处理、功率放大器等集成在结构中, 通过机械、热、光、化学、电、磁等激励和控制, 使智能结构不仅具有承受荷载的能力, 还具有识别、分析、处理及控制等多种功能, 并能进行数据传输和多种参数的检测, 而且还能动作, 从而使智能结构能够自行诊断变形、损伤和老化的发生, 能够自发产生与状态对应的形状变化, 能够对振动、冲击进行适应性调整, 能够根据需要对结构或材料进行控制和修复, 即具有自诊断、自适应、自学习、自修复、自增值、自衰减等能力。但土木工程结构和基础设施体积大、跨度长、分布面积大、使用期限长, 传统的传感设备组成的长期监测系统的性能稳定性和耐久性都不能很好地满足工程的实际需要。近年来发展起来的高性能、大规模分布式智能传感元件为土木工程智能监测系统的发展提供了基础。

近年来, 智能材料取得了显著的进步和发展, 然而还需不断进行创新和深入研究。未来智能材料的主要发展趋势包括以下三个方面:

(1) 智能材料集成化和小型化 智能材料发展的最终归属是为智能结构服务, 为满足智能结构的多功能需要, 往往需要智能控制与自诊断、自适应和自修复等智能材料相结合, 促使材料从感知、控制、适应和修复的集成化, 如图 1-1 所示。而智能材料的小型化无疑将

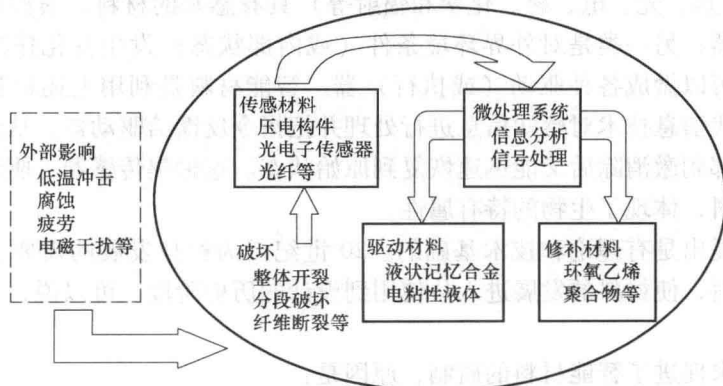


图 1-1 智能材料多功能的集成化

有利于智能材料的埋入及与其他基材的复合。

(2) 开发神经中枢网络控制材料 控制材料是智能材料集成化的关键，神经中枢网络控制材料不仅为智能材料获得实时动态响应，而且提供学习和决策功能。因此，必须大力探索 and 开发神经中枢网络控制材料的模型，发现新的研究方法和新的制造工艺。

(3) 完善智能材料的仿生功能 未来的智能材料具有多种仿生功能，包括类似骨骼系统（基材）提供承载能力，神经系统（内埋传感网络）提供监测、感知能力，肌肉系统（驱动元件）提供调整适应响应，免疫系统（修复元件）提供康复能力，神经中枢系统（控制元件）提供学习和决策能力。

1.3 智能材料的内涵和定义

所谓智能材料，顾名思义，就是一种能“感觉”出周围环境的变化，并且能针对这一变化采取相应对策的材料。当它接受到外界的振动、压力、声音、温度、电磁波等物理量的变化时，其性状也会随之变化。也就是说，智能材料是对环境具有自感知和记忆、自适应、自修复能力的多功能新材料。它具有仿生的特点：传感材料作为神经系统，驱动材料充当有机体的肌肉组织，而控制和计算系统像大脑一样进行实时反应。智能材料包括那些能对环境产生反应的液体、合金、合成物、水泥、玻璃、陶瓷塑料等，其应用领域十分广阔。

1.3.1 智能材料的内涵

20 世纪 80 年代中期，航空航天需求驱动了智能材料与结构的研究与发展。1988 年 4 月 28 日波音 737 客机在美国出现灾难性断裂事故，使美国国会意识到，为避免服役中的飞机发生类似事故，飞机应有自我诊断和及时预报系统，并通过议案，要求 3 年内完成 Smart 飞机的概念设计。近年来，高速、重载飞行器的发展要求以及大型工程机构的安全和质量问题引起了各国政府、工程技术界的广泛关注。概括起来，关注的主要领域有：飞行器机翼的疲劳断裂检测及形状自适应控制，湍流控制的智能蒙皮，大型柔性空间机构的阻尼振动控制，桥梁、建筑等振动的主动控制以及风灾和地震时的自适应控制，机构健康检测，土建施工中的质量检测，火警探测及控制，管道系统的腐蚀和冲蚀探测，高寂静产品的噪声控制，空气质量、温度控制及减振降噪，能量的最佳利用，在用系统性能的评估和残留寿命的预测，机器人的人工四肢等。

近年来，随着信息、材料及工程科技的发展，科学家和工程师从自然界和生物体进化的学习和思考中受到启发，可以用图 1-2 来对比生物体和智能系统。

感知器（神经元），即俗称的传感器，可以用感知材料制得。它能对外界或内部的刺激强度（如应力、应变、热、光、电、磁、化学和辐射等）具有感知功能。

执行器（肌肉），用执行材料制得。

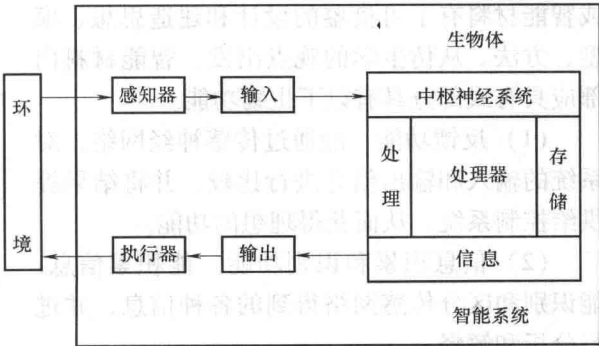


图 1-2 生物体与智能系统的对比示意图

它能在外界环境条件或内部状态发生变化时作出反应。

信息处理（大脑），可以用信息材料通过微电子技术制得。

人们力图借鉴生物体的功能特征从根本上解决工程结构的质量安全监控问题，从而提出了智能材料系统与结构（Intelligent Material Systems and Structure，简称 IMSS）的概念。

正如生物体是通过各种生物材料构成的一样，智能系统是通过材料间的有机复合或集成而得以实现。科学实践证明，在非生物材料中注入“智能”特性是可以做到的。自工业革命以来，非生物自适应控制系统的使用已相当有效，尤其是计算机的发展和可用性人工智能的研究，使 IMSS 的研究在 20 世纪中期就被提出。例如，半导体技术可以使材料与器件集成封装在一小块芯片上，通过各种具有传感性能的材料使各类信息（力、声、热、光、电、磁、化学信息）互相转换和传递。如果能把感知、执行和信息等三种功能材料有机地复合或集成于一体，就可能实现材料的智能化。

表 1-1 列出了常见的感知材料和执行材料。表中有些材料兼具感知和执行功能，如磁致伸缩材料、压电材料和形状记忆材料等。这种材料统称为机敏材料（Smart Materials），它们能对环境变化作出适应性反应。图 1-3 所示为机敏材料的双重功能对环境变化作出的反应示意图。

表 1-1 应用于机敏材料与结构中的感知材料和执行材料

名 称	感 知	执 行
声发射材料	√	
电感材料	√	
电流变液		√
电致伸缩材料		√
光导纤维	√	
磁致伸缩材料	√	√
压电材料	√	√
形状记忆材料	√	√
电阻应变材料	√	
X 感光材料	√	

通过对生物结构系统的研究和考察，机敏或智能材料有了可借鉴的设计和建造思想、模型、方法。从仿生学的观点出发，智能材料内部应具有或部分具有以下生物功能。

（1）反馈功能 能通过传感神经网络，对系统的输入和输出信息进行比较，并将结果提供给控制系统，从而获得理想的功能。

（2）信息积累和识别功能 能积累信息，能识别和区分传感网络得到的各种信息，并进行分析和解释。

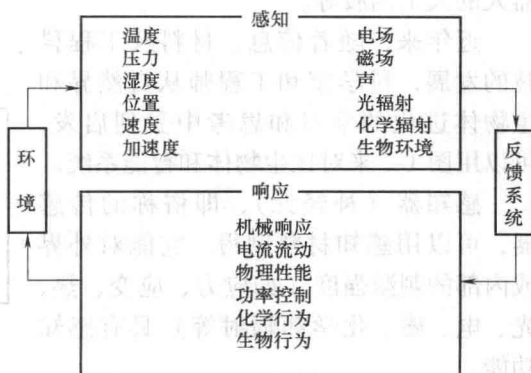


图 1-3 机敏材料的感知功能和执行功能

(3) 学习能力和预见性功能 能通过对过去经验的收集,对外部刺激作出适当反应,并可预见未来并采取适当的行动。

(4) 响应性功能 能根据环境变化适时地动态调节自身并作出反应。

(5) 自修复功能 能通过自生长或原位复合等再生机制,来修补某些局部破损。

(6) 自诊断功能 能对现在情况和过去情况作比较,从而能对诸如故障及判断失误等问题进行自诊断和校正。

(7) 自动动态平衡及自适应功能 能根据动态的外部环境条件不断自动调整自身的内部结构,从而改变自己的行为,以一种优化的方式对环境变化作出响应。

图 1-4 说明智能材料应包括的属性。当然,这里指的是高级智能材料,虽然目前尚难做到,但却是未来实现的目标。

具有上述结构形式的材料系统,就有可能体现或部分体现下列智能特性:① 具有感知功能,可感知并识别外界(或内部)的刺激强度;② 具有信息传输功能,以设定的优化方式选择和执行响应;③ 具有对环境变化作出响应及执行的功能;④ 反应灵敏、恰当;⑤ 外部刺激条件消除后能迅速恢复到原始状态。

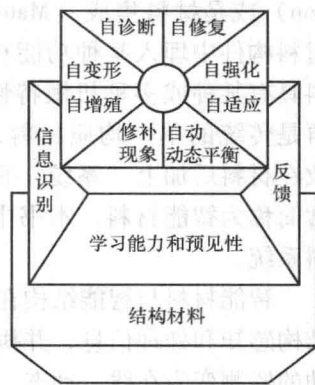


图 1-4 智能材料的属性

1.3.2 智能材料的定义

20 世纪 70 年代,美国弗吉尼亚理工学院及州立大学的 Claus 等人将光纤埋入碳纤维增强复合材料中,使材料具有感知应力和断裂损伤的能力。这是智能材料的首次实验,当时称这种材料系统为自适应材料(Adaptive Material)。从 1985 年开始,在 Rogers 和 Claus 等人的努力下,智能材料系统逐渐受到美国各部门和世界各国研究者的重视,研究者先后提出了机敏材料、机敏材料与结构(Smart Materials and Structures)、自适应材料与结构(Adaptive Materials and Structures)、智能材料系统与结构(Intelligent Materials Systems and Structures)等名称。从表面上看,各名称有所不同,但研究的内容大体相同,都含有“智能”特性。Rogers 在《智能材料系统——新材料时代的曙光》一文中认为,生物结构系统难于区分材料与结构,智能材料与结构只是尺度上的差别,即材料的智能与生命特性存在于材料的微结构中,而结构是在制造过程中集成的。因此,Rogers 认为智能材料系统(Intelligent Material Systems,简称 IMS)的定义可归结为两种。第一种定义是基于技术观点:“在材料和结构中集成有执行器、传感器和控制器”。这个定义叙述了智能材料系统的组成,但没有说明这个系统的目标,也没有给出制造这种系统的指导思想。另一种定义是基于科学理念观点:“在材料系统微结构中集成智能与生命特征,达到减小质量、降低能耗并产生自适应功能的目的。”该定义给出了智能材料系统设计的指导性哲学思想,抓住材料仿生的本质,着重强调材料系统的目标,但没有定义使用材料的类型,也没有叙述其具有传感、执行与控制功能。我们认为若把两者结合在一起,就能形成一个完整、科学的定义:智能材料是模仿生命系统,能感知环境变化,并能适时地改变自身的一种或多种性能参数,作出所期望的、能与变化后的环境相适应的复合材料或材料的复合。

智能材料与结构的构成如图 1-5 所示。单一的人工材料无法同时具备这些功能。只有将

各种材料制成的感知器、执行器和控制器等集成或组装在一起,通过在这些功能之间建立起动态的联系,使之相互作用、相互依存,才有可能实现材料智能化。

机敏或智能材料并非一定是专门研制的一种新型材料,大多是根据需求选择两种或多种不同的材料按照一定的比例以某种特定的方式复合起来(Material Composition)或是材料集成(Material Integration),即在所使用材料构件中埋入某种功能材料或器件,使这种新组合材料具有某种或多种机敏特性甚至智能化。这样,它已不再是传统的单一均质材料,而是一种复杂的材料体系,故在材料后加上“系统”两字,成为智能材料系统,通常简称为智能材料。本书中所说的智能材料均指智能材料系统。

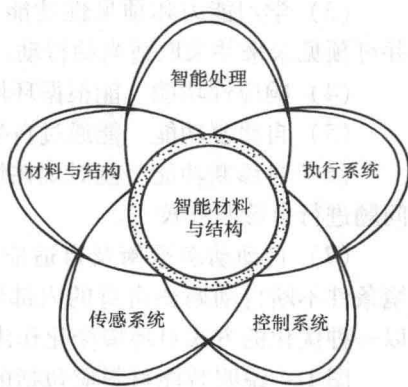


图 1-5 智能材料与结构的构成

智能材料与智能结构在尺度上是有区别的。若把智能材料植入工程结构中,就能使工程结构感知和处理信息,并执行处理结果,对环境的刺激作出自适应响应,使离线、静态、被动的监测变为在线、动态、实时、主动监测与控制,实现增强结构安全、减轻质量、降低能耗、提高结构性能等目标。这种工程结构称为智能结构(Intelligent Structure)。

通过以上对智能材料定义的讨论,可归纳出以下几点:

- 1) 智能材料的研究要立足于剖析、模仿生物系统的自适应结构和老化过程的原理、模式、方式与方法,使未来工程结构具有自适应生命功能。
- 2) 材料可以看做智能材料的主体。它的范围可以从生物材料到高分子材料,从无机材料到金属材料,从复合材料到大型工程结构。它将用作制造汽车、飞机及桥梁等的新型材料,有关这种材料的理论也可指导人类器官和肢体的设计。
- 3) 智能材料不是仅仅简单地执行设计者预先设置的程序,而且应该对周围环境具有学习能力,能够总结经验,对外部刺激作出适当反应。
- 4) 智能材料不仅具有环境自适应能力,同时能够为设计者和使用者提供动态感知和执行信息的能力。
- 5) 智能材料拉近了人造材料与人之间的距离,增加了人、机的“亲近感”。

1.4 耗散结构与材料的内禀特性

智能材料模仿了生命系统的感知和驱动功能。该研究领域的出现使人们把越来越多的目光投向天然生物材料。天然生物材料的基本组成单元很平常,但是往往由具有适应环境及功能需要的复杂结构组合,它表现出的优异强韧性、功能适应性及损伤自愈合能力,是传统人工合成材料所无法比拟的。

1.4.1 耗散结构

生物材料之所以具有活性,是因为它们在“服役”过程中不断与外界环境进行能量和(或)物质交换。例如,动物要靠摄取食物生存,通过糖分解和呼吸等生机勃勃的生物反应

和运输作用来维持生命；植物利用光合作用，从太阳光中获得能量，从土壤和水分中吸取所需养分。所以，维持生物体生命和生存活动的自保护、自修复、自调节、自适应、自繁殖等都要求从外界吸取能量和（或）进行物质交换。长期以来，不同领域的科学家注意到，在生命系统和非生命系统之间表现出似乎不同的规律。非生命系统通常服从热力学第二定律，系统总自发地趋于平衡和有序，但决不会自发地转变到有序，这就是系统的不可逆性和平衡态的稳定性。生命系统与此不同，生物进化总是由简单到复杂，由低级到高级，越来越有序，能自发地形成有序的稳定结构。这两类系统的矛盾长期得不到解决。直到20世纪60年代出现了耗散结构理论和协同学理论，才为这个问题的解决搭建了科学框架。诺贝尔奖获得者 Prigogine 于1970年在国际理论物理和生物学会议上正式提出“耗散结构（Dissipative Structure）理论”。耗散结构是指从环境输入能量或（和）物质，使系统转变为新型的有序形态，即这种形态依靠不断地耗散能量或（和）物质来维持。一个生物体作为一个整体来接受连续的能量流或（和）物质流，然后转换为各种废物排泄到环境中去。生命的机体就是这样保持动态稳定的系统，这种动态稳定能够抗拒环境对机体的瓦解性侵蚀。生命品种的存在，取决于其动态调节的能力。也就是说，生命系统是一个开放系统，系统与环境进行着物质和能量的交换，从而引进负熵。尽管系统内部产生正熵，但总的熵在减小，达到一定程度时，系统就有可能从原来的无序状态产生一种新的稳定的有序结构。Prigogine 称之为耗散结构。

生物体越是出于一种远离平衡的有序结构，就标志着其“进化”越高级。生物系统是分层次的，各种有机体都按严格的等级组织起来，从活的分子到多细胞个体，再到超个体的聚合物，层次分明。这充分体现了生物体中分子与构成无生命物质的分子没有本质上的区别。但生物体却具有比无生命物质复杂得多的优异性能，说明生物体的功能并不是组成生物体的各种组织功能的简单线性叠加。

非生命系统，这里主要指无生命的材料，热力学第二定律的观点认为它们是一个孤立系统，即他们与环境没有能量和物质的交换，通常可以用下列函数关系来表达

$$P = f(C, S, M)$$

式中 P ——材料的服役性能；

C ——材料的成分；

S ——材料的结构；

M ——材料的形貌。

因此，它们的系统内部就不可能呈现生命的活性。

倘若通过众多的通道，例如化学的、物理的以及生物的手段为材料提供物质和能量的输送，就可以用下列函数关系来表达材料的仿生设计

$$P = \varphi(C, S, M, \theta)$$

式中 θ ——环境变量，它意味着环境向材料提供能量和物质就可使“死”的材料变成“活”的材料。

根据这种启发，现在就有学者提出金属材料疲劳及性能恢复的仿生设计，模仿生物的机能恢复和创伤愈合，向服役的材料施加高密度电流脉冲，使其疲劳寿命等显著提高。

1.4.2 材料的内禀特性

依据智能（或机敏）材料定义中所确定的内涵，组成智能材料的组元材料可分为传感材料、信息材料、执行材料、自适应材料（仿生材料）以及两类支撑材料（能源材料和结构材料）。能源材料用作维持系统工作所需的动力，结构材料是支撑功能材料的基体材料或构件。

表 1-2 列出了材料的感知信息功能和传递功能的符号。表中 P_{ij} 按 $i、j$ 划分：当 $i=j$ 时， P_{ij} 是材料的感知信息（能源）特性，它们可以是力、声、热、光、电、磁、化学和辐射；当 $i \neq j$ 时， P_{ij} 代表不同能量之间传递的特性。由于电学性能易于放大、传输和调节，因而通常寻求具有 P_{is} 的性能。通过这类材料，将所输入的各种信息转换为电学信息而输出。例如，应变电阻合金、磁致伸缩材料和热敏电阻合金的性能分别是 P_{15} 、 P_{65} 、 P_{35} ，还有许多能用来探测环境中气体含量的“器皿陶瓷材料”的性能是 P_{75} 。常见的感知器用陶瓷材料列于表 1-3。常见的具有感知和传递功能材料列于表 1-4。例如，表 1-4 中的 P_{31} 表示热-力转换材料，对应的材料有膨胀合金、双金属片和形状记忆合金，它们在环境温度或热量改变时输出应力和应变。又如，光导纤维损耗低，信息传输容量大，抗干扰性强，可从表 1-5 中查出其在不同场合下的感知功能。光导纤维对应于表 1-2 中的 P_{14} P_{34} P_{44} P_{54} P_{64} 和 P_{74} 。

表 1-2 材料的信息感知与传递功能符号

输出 j \ 输入 i	力	声	热	光	电	磁	化
力	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}
声	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}	P_{27}
热	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	P_{35}	P_{36}	P_{37}
光	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	P_{45}	P_{46}	P_{47}
电	P_{51}	P_{52}	P_{53}	P_{54}	P_{55}	P_{56}	P_{57}
磁	P_{61}	P_{62}	P_{63}	P_{64}	P_{65}	P_{66}	P_{67}
化	P_{71}	P_{72}	P_{73}	P_{74}	P_{75}	P_{76}	P_{77}

表 1-3 感知器用陶瓷材料

	材 料	效 应		输 出
温度感知器	NiO, FeO, CaO, Al ₂ O ₃ , SiC (成型、薄膜)	载流子浓度随 温度的变化	负温度系数	阻抗变化
	半导体 BaTiO ₃ (烧结体)		正温度系数	
	VO ₂ , VO ₃	半导体-金属相变		磁化变化
	Mn-Zn 系铁酸盐	弗里磁体-常磁转变		
位置速度感知器	PZT (钛锆酸盐)	压力效应		反射波的波形变化
光感知器	LiNbO ₃ , LiTaO ₃ , PZT, SrTiO ₃	热电效应		电动势
	Y ₂ O ₃ S(Eu)	荧光		可见光
	ZnS(Cu, Al)			
	CaF ₂	热荧光		

(续)

	材 料	效 应	输 出
气体感知器	Pt 催化剂/氧化铝/Pt 线	可燃性气体接触燃烧反应	阻抗变化
	SnO ₂ , ZnO, γ -Fe ₂ O ₃ , LaNiO ₃ , (La, Sr)CoO ₃	氧化物半导体气体脱吸 附引起的电荷转移	
	TiO ₂ , CoO-MgO	氧化物半导体化学比的变化	
	ZrO ₂ -CaO, MgO, Y ₂ O ₃ -Li ₂ O	高温固体电解质燃料电池	电动势
湿度感知器	LiCl, P ₂ O ₅ , ZnO-Li ₂ O	吸湿离子传导	阻抗变化
	TiO ₂ , NiFe ₂ O ₄ , TiO ₂ , ZnO, Ni 铁酸盐, Fe ₃ O ₄ 乳胶	氧化物半导体	
	Al ₂ O ₃	吸湿引起电导率变化	电导率

表 1-4 具有感知功能和传递功能的材料

功 能	材 料	现象或机制
P_{31} (热→力)	膨胀合金	热胀冷缩
	双金属片	热胀冷缩
	形状记忆合金	形状记忆
P_{41} (光→力)	光敏性凝胶	光刺激导致相转变体积溶胀
P_{51} (电→力)	电致伸缩材料	在电场作用下伸缩
	压电材料	在电场作用下产生力
	电流变液	在电场作用下流体粒子极化
	电活性凝胶	在电场作用下离子迁移导致凝胶体积和形状变化
P_{61} (磁→力)	磁致伸缩材料	磁致伸缩
	磁流变液	在磁场作用下流体粒子磁化
P_{71} (化→力)	智能高分子凝胶	化学信号刺激使高分子收缩或溶胀
P_{32} (热→声)	形状记忆合金凝胶	马氏体相变产生声发射信号
P_{14} (力→光)	光导纤维	力致光双折射及吸收变化
P_{24} (声→光)	声光晶体	超声波在介质中产生的弹性力使介质折射率变化
	声光玻璃	
P_{34} (热→光)	光导纤维	温度引起的折射及吸收变化
P_{44} (光→光)	光导纤维	X 射线或 γ 射线引起变化
	光致发光材料	晶格间空位或离子、原子迁移发光
P_{47} (光→化)	感光材料	在光的作用下发生化学反应
P_{54} (电→光)	光导纤维	电光效应, 光致色差
	电光晶体	电场作用使晶体折射率发生变化
P_{64} (磁→光)	光导纤维	磁致发光效应
	磁光材料	偏振光通过磁场时发生偏转
P_{15} (力→电)	压电材料	压电效应
	应变电阻合金	应变改变电阻率

(续)

功 能	材 料	现象或机制
P_{25} (声→电)	声敏材料	声波振动产生压力, 压力产生电信号
P_{35} (热→电)	热敏电阻	电阻率随温度变化
	热释电材料	加热使屏蔽电荷失去平衡, 产生电位差
P_{45} (光→电)	光电材料	光电效应
	光敏电阻	入射光强弱改变电阻值
P_{65} (磁→电)	磁致巨阻材料	电阻率随磁场变化
P_{75} (化→电)	气敏陶瓷材料	气体改变电阻率
	湿敏陶瓷材料	电阻率随环境湿度变化

表 1-5 光纤感知功能

i	P_{ij}	现 象
1	P_{14}	力致光双折射、光吸收变化
3	P_{34}	温度引起光的折射及吸收变化
4	P_{44}	X 射线、 γ 射线引起发光
5	P_{54}	电光效应, 电致色差
6	P_{64}	磁致发光效应
7	P_{74}	成分变化引起光折射、光吸收变化 荧光

一般情况下, 需要将力输入给执行材料后, 执行材料才能启动。因此, 执行材料为 $j=1$ 的功能材料, 性能为 P_{i1} 。表 1-4 中属于这类材料的有: P_{31} , 如膨胀合金、双金属片和形状记忆合金; P_{51} , 如电致伸缩材料、电流变液 (Electrorheological Fluid, 简称 ER); P_{61} , 如磁致伸缩材料、磁流变液等。表 1-6 列出常见的几种执行材料的特性。执行材料的种类要比感知材料少得多, 因此, 作为智能材料的组元来说, 执行材料的研究和开发是一项重要课题。

表 1-6 智能材料中部分执行材料的特性

材料 特性	形状记忆合金 Nitinol	压电陶瓷 PZTG-119	压电薄膜 PVDF	电致伸缩 材料 PMN	磁致伸缩材料 Terfenol-D
最大应变/ μm	20000	1000	700	1000	2000
弹性模量/GPa	28 (马氏体) 90 (奥氏体)	62	2	117	48
合成应变/ μm	8500 (奥氏体)	350	10	500	580
响应频率/Hz	0 ~ 5	1 ~ 20000	0.1 ~ 20000	1 ~ 20000	1 ~ 20000
可埋入性	好	好	好	好	好
稳定性	好	好	中	好	好
使用形式	薄带、线、膜	薄片	薄膜	薄带、线	薄带、线
技术成熟性	良好	好	较好	好	较好